

「時間生成学—時を生み出すところの仕組み」

領域番号：8002

平成30年度～令和4年度

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）

（新学術領域研究（研究領域提案型））

研究成果報告書

令和6年5月

領域代表者 北澤 茂

大阪大学・生命機能研究科・教授

研究組織

計画研究

領域代表者 北澤 茂 (大阪大学・生命機能研究科・教授)

(総括班)

研究代表者 北澤 茂 (大阪大学・生命機能研究科・教授)

(A01 班)

研究代表者 嶋田 珠巳 (明海大学・外国語学部・教授)

研究分担者 青山 拓央 (京都大学・大学院人間環境学研究科・准教授)

研究分担者 浅原 正幸 (国立国語研究所・コーパス開発センター・教授)

研究分担者 小林 一郎 (お茶の水女子大学・基幹研究院・教授)

(B01 班)

研究代表者 北澤 茂 (大阪大学・生命機能研究科・教授)

研究分担者 中野 珠実 (大阪大学・生命機能研究科・准教授)

研究分担者 貴島 晴彦 (大阪大学・大学院医学系研究科・教授)

研究分担者 西本 伸志 (大阪大学・生命機能研究科・教授)

(C01 班)

研究代表者 田中 真樹 (北海道大学・医学研究院・教授)

研究分担者 村上 郁也 (東京大学・大学院人文社会系研究科・教授)

研究分担者 寺尾 安生 (杏林大学・大学院医学研究科・教授)

研究分担者 天野 薫 (東京大学大学院・情報理工学系研究科システム情報学専攻・教授)

(D01 班)

研究代表者 平田 聡 (京都大学・野生動物研究センター・教授)

研究分担者 上原 泉 (お茶の水女子大学・人間発達教育科学研究所・准教授)

研究分担者 酒井 裕 (玉川大学脳科学研究所・教授)

(E01 班)

研究代表者 池谷 裕二 (東京大学・薬学系研究科・教授)

研究分担者 梅田 聡 (慶應義塾大学文学部・教授)

研究分担者 河村 満 (昭和大学・医学部・名誉教授)

研究分担者 藤澤 茂義 (国立研究開発法人理化学研究所・脳神経科学研究センター・チームリーダー)

公募研究（前期）

研究代表者	程 飛	(京都大学・情報学研究科・特定助教)
研究代表者	有田 節子	(立命館大学・言語教育情報研究科・教授)
研究代表者	池上 高志	(東京大学・総合文化研究科・教授)
研究代表者	田中 雅史	(早稲田大学・文学学術院・専任講師)
研究代表者	武井 智彦	(京都大学・医学研究科/白眉センター・特定准教授)
研究代表者	林 正道	(情報通信研究機構・脳情報通信融合研究センター・研究員)
研究代表者	蝦名 鉄平	(東京大学・医学系研究科・助教)
研究代表者	村上 誠祥	(山梨大学・総合研究部医学域・特任助教)
研究代表者	四本 裕子	(東京大学・総合文化研究科・准教授)
研究代表者	平野 有沙	(筑波大学・医学医療系・国際統合睡眠医科学研究機構・助教)
研究代表者	伊藤 浩介	(新潟大学・脳研究所・特任准教授)
研究代表者	土居 裕和	(国土館大学・理工学部・准教授)
研究代表者	月浦 崇	(京都大学・人間・環境学研究科・教授)
研究代表者	兔田 幸司	(慶應義塾大学・文学部・助教)

公募研究（後期）

研究代表者	程 飛	(京都大学・情報学研究科・特定助教)
研究代表者	山口 淳	(千葉大学・大学院医学研究院・教授)
研究代表者	池上 高志	(東京大学・大学院総合文化研究科・教授)
研究代表者	羽倉 信宏	(国立研究開発法人情報通信研究機構・ 未来 ICT 研究所脳情報通信融合研究センター・主任研究員)
研究代表者	蝦名 鉄平	(東京大学・大学院医学系研究科・講師)
研究代表者	小野 大輔	(名古屋大学・環境医学研究所・講師)
研究代表者	武井 智彦	(玉川大学・脳科学研究所・准教授)
研究代表者	水田 恒太郎	(国立研究開発法人理化学研究所・ 生命機能科学研究センター・上級研究員)
研究代表者	堤 新一郎	(国立研究開発法人理化学研究所・ 脳神経科学研究センター・副チームリーダー)
研究代表者	林 正道	(国立研究開発法人情報通信研究機構・ 未来 ICT 研究所脳情報通信融合研究センター・研究員)
研究代表者	橋本 照男	(東北大学・加齢医学研究所・助教)
研究代表者	野村 洋	(名古屋市立大学・医薬学総合研究院(医学)・教授)
研究代表者	伊藤 浩介	(新潟大学・脳研究所・准教授)
研究代表者	宮本 大祐	(富山大学・学術研究部医学系・准教授)
研究代表者	小澤 貴明	(大阪大学・蛋白質研究所・助教)
研究代表者	倉岡 康治	(関西医科大学・医学部・助教)
研究代表者	平野 有沙	(筑波大学・医学医療系・助教)

交付決定額

年度	合計	直接経費	間接経費
平成 30 年度	315,770,000 円	242,900,000 円	72,870,000 円
令和元年度	297,570,000 円	228,900,000 円	68,670,000 円
令和 2 年度	297,180,000 円	228,600,000 円	68,580,000 円
令和 3 年度	299,260,000 円	230,200,000 円	69,060,000 円
令和 4 年度	298,870,000 円	229,900,000 円	68,970,000 円
合計	1,508,650,000 円	1,160,500,000 円	348,150,000 円

研究発表

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和 5 年 6 月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に 5 頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に*印を付すこと。

【A01】「作る」班

<計画研究> 雑誌論文

- *浅原 正幸・川崎 采香・上原 泉・酒井 裕・谷口 巴・小林 一郎・越智 綾子・鈴木 彩香, 「過去」「未来」を主題とする作文の分析, 計量国語学, 34 卷 1 号, (2023,印刷中) (A01, D01 の共同)
- *小林一郎. ヒト脳における時間認識時の脳内状態推定. *Clin Neurosci*, 41(8), 4p. (印刷中).
- *Shimada, T. Contact-induced grammar formation: A model from a study on Hiberno-English. *Front Commun*, DOI 10.3389/fcomm.2022.832128 (2022).
- Kaji, H., Sasaki, F. & *Shimada, T. A contrastive study of basic terms of temporality and semantic change: Towards a lexical typology of time. *LACUS forum* 46: 3, 41-56 (2022).
- *浅原 正幸・田中 弥生 (2018), 修辞ユニット分析における脱文脈化指数の妥当性の検証, 国立国語研究所論集, 15 号, p.p.1-15.

書籍

- 永井均, 入不二基義, 青山拓央, 谷口一平, 『〈私〉の哲学 をアップデートする』, 春秋社, 2023.
- 平田聡・嶋田珠巳 『時間はなぜあるのか? チンパンジー学者と言語学者の探検』 ミネルヴァ書房, 2022.(A01, D01 の共同研究)
- 嶋田珠巳・鍛冶広真 編著『時間と言語』三省堂, 2021.
- 森田邦久 (編), 青山拓央ほか (共著), 『〈現在〉という謎 時間の空間化批判』, 勁草書房, 2019.
- 青山拓央 『心にとって時間とは何か』, 講談社, 2019.

学会発表

- Yoshimoto, K., Tabolt, J., Zhou, Z. Kaji, H. & Shimada, T. The Discourse Function of Aspect in Japanese. *Proc 19th Internat Workshop of Logic and Eng Nat Lang Semantics* 19, 98-102. (2022).
- * Kanashiro Pereira, L., Duh, K., Cheng, F., Asahara, M. & Kobayashi, I. Attention-Focused Adversarial Training for Robust Temporal Reasoning. The Eur Lang Res Association 2022, Marseille, France, Jun.20-25, (2022).
- Geng, C., Cheng, F., Asahara, M., Kanashiro Pereira, L., Kobayashi, I. Dependency enhanced contextual representations for Japanese temporal relation classification. *Proceedings of the 35th Pacific Asia Conference on Language, Information and Computation*, 170-179, (2021).
- * Kanashiro Pereira, L., Liu, X., Cheng, F., Asahara, M., Kobayashi, I. Adversarial Training for Commonsense Inference. *Association for Computational Linguistics 2020 (ACL2020)*, (2020).
- *Cheng, F., Asahara, M., Kobayashi, I., Kurohashi, S. Dynamically updating event representations for temporal relation classification with multi-category learning. *EMNLP (Findings)* 1352-1357, (2020).
- 浅原正幸, 加藤 祥. BERTed-BCCWJ: 多層文脈化単語埋め込み情報を付与した『現代日本語書き言葉均衡コーパス』データ. 言語処理学会第 26 回年次大会, (2020).

主催シンポジウム

時間言語フォーラム 期間：2019 年 5 月～2023 年 5 月までに、全 15 回実施。詳細は 3 頁。

Australian Systemic Functional Linguistics Association 2019 テーマセッション “Linguistic Chronogenesis: Text, Time, and the Processing of Temporal Experience” (越智 綾子、浅原 正幸、小林 一郎)

アウトリーチ

青山拓央, 岡ノ谷一夫, 「討議 幻想を超えて世界のありかたを語るために」, 『現代思想』, 49-9 号, 青土社, pp. 8-22, 2021.

<公募班> 書籍

有田節子. 「第 10 章 因果関係と時間 — 「原因」「結果」を主名詞とする連体修飾節を中心に」, 嶋田 珠巳・鍛冶広真 編著『時間と言語』三省堂. 167-184 頁. 2021.

学会発表

Wan, Z., Cheng, F., (他 4 名). Relation Extraction with Weighted Contrastive Pre-training on Distant Supervision. Proc 17th Conf Eur Chapt Assoc Comp Linguistics (EACL), 2023, Dubrovnik.

【B01】「流れる」班

<計画研究> 雑誌論文 (英文 27 報中 11 報を掲載)

Hanyu, N., Watanabe, K. & *Kitazawa, S. Ready to detect a reversal of time's arrow: a psychophysical study using short video clips in daily scenes. *R Soc Open Sci* **10**, 230036 (2023).

*Takagi Y, Nishimoto, S. High-resolution image reconstruction with latent diffusion models from human brain activity, *The IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, (2023).

Moharramipour, A., Takahashi, T. & *Kitazawa, S. Distinctive modes of cortical communications in tactile temporal order judgment. *Cereb Cortex* **33**, 2982-2996 (2023).

*Nakano, T. & Yamamoto, T. You trust a face like yours. *Hum Soc Sci Commun* **9** (2022).

Tang, L., Takahashi, T., Shimada, T., Komachi, M., Imanishi, N., Nishiyama, Y., . . . Kitazawa, S. Neural correlates of temporal presentness in the precuneus: A cross-linguistic fMRI study based on speech stimuli. *Cereb Cortex* **31**, 1538-1552 (2021). (A01, B01 の共同研究)

Nakai, T., *Nishimoto, S. Quantitative models reveal the organization of diverse cognitive functions in the brain. *Nat Commun* **11**, 1142, (2020).

Yamazaki, Y. & *Kitazawa, S. Transcranial static magnetic stimulation of the precuneus erases short-term scene memories. *SSRN Electronic Journal* doi:10.2139/ssrn.3741228, (2020).

*Yanagisawa, T., Fukuma, R., (他 4 名), Kishima, H., Kamitani, Y., Saitoh, Y. BCI training to move a virtual hand reduces phantom limb pain: A randomized crossover trial. *Neurology* **95**, e417-e426 (2020).

Shiraishi, Y., (3 名), Yamamoto, S., Saitoh, Y., Kishima, H., *Yanagisawa, T. Neural decoding of electrocorticographic signals using dynamic mode decomposition., *J Neural Eng* **17**(3), 036009, (2020).

Nishimura, N., Uchimura, M., Kitazawa, S. Automatic encoding of a target position relative to a natural scene. *J Neurophysiol* **122**: 1849-60, 2019

Aoe, J., Fukuma, T., *Yanagisawa, T., (他 4 名), Yamamoto, S., Onishi, Y., Kishima, H., Automatic diagnosis of neurological diseases using MEG signals with a deep neural network. *Sci Rep* **9**(1):5057, (2019).

*北澤 茂. 時間を生み出すところと脳. *Clin Neurosci*, 41(8), 4p. (印刷中).

学会発表

Hanyu, N., Watanabe, K. & Kitazawa, S. Neural correlates of subjective discrimination between the directions of time flow. in *Neuro 2022* 1P-085 (Okinawa, 2022).

Kitazawa, S. The here and now the default mode network. International Conference on Consciousness Research Network, Okazaki, Japan, 2019

中野珠実, 阪田篤哉, 岸本章宏. 深層学習を用いた瞬き確率推定によるハイライト映像の自動抽出. 情報処理学会全国大会, (2020).

書籍 北澤 茂. 医師と医学生のための人工知能入門 192p, 中外医学社 (2020)

西本伸志. 脳内の意味表現『AI 事典 第 3 版』(中島秀之ら編) pp.336-337, 近代科学社 (2019)

主催シンポジウム

The 5th CiNet Conference: Computation and representation in brains and machines (2019 年 2 月 20-22 日)

アウトリーチ

北澤 茂. “時間”命を刻む神秘のリズム NHK ヒューマニエンス Q 2023 年 3 月 6 日

北澤 茂. 「時間」とは何か? NHK BS コズミックフロント 2022 年 1 月 6 日

<公募研究> 雑誌論文 (英文9報中2報を掲載)

Jitsuishi, T. & *Yamaguchi, A. Characteristic cortico-cortical connection profile of human precuneus revealed by probabilistic tractography. *Sci Rep* **13**, 1936 (2023).

Kojima, H. & Ikegami, T. Organization of a Latent Space structure in VAE/GAN trained by navigation data. *Neural Netw* **152**, 234-243 (2022).

学会発表 Ogas, K., Yokoi, A., Okazawa, G., Hirashima, M. & Hagura, N. Decision uncertainty as a context for motor memory. *MLMC: Advances in Motor Learning & Motor control*. (2021.10)

【C01】「刻む」班

<計画研究> 雑誌論文 (英文 56 報中 14 報を掲載、邦文 1 報)

*Nakada, H., Murakami, I. Local motion signals silence the perceptual solution of global apparent motion. *J Vision*, (in press).

*Kameda, M., Niikawa, K., Uematsu, A., *Tanaka, M. Sensory and motor representations of internalized rhythms in

- the cerebellum and basal ganglia. *PNAS*, 120, e2221641120, (2023).
- *Fiscaro F, (4 名), Ferri R, Terao Y, Ugawa Y, Pennisi M. The supporting (sometimes decisive!) role of transcranial magnetic stimulation in forensic medicine. *Brain Stimul*, S1935-861X(23)01679-0, (2023).
- Honma M, Sasaki F, (5 名), Iwamuro H, Shimo Y, Oyama G, Hattori N, *Terao Y. Role of the subthalamic nucleus in perceiving and estimating the passage of time. *Frontier Aging Neurosci*, 15:1090052, (2023).
- Okada, K-I., Takeya, R., *Tanaka, M. Neural signals regulating motor synchronization in the primate deep cerebellar nuclei. *Nat Commun*, 13, 2504, (2022).
- *Nakamura, T., Murakami, I. Temporal resolution and temporal extent of orientation repulsion. *Vision Res*, 200, 108104, 1-11, (2022).
- Oishi, H., *Takemura, H., Amano, K. Macromolecular tissue volume mapping of lateral geniculate nucleus subdivisions in living human brains, *NeuroImage*, 119777, (2022).
- Kimura, I., Ugawa, Y., Hayashi, M., *Amano, K. Quadripulse Stimulation: A Replication Study with A Newly Developed Stimulator, *Brain Stimulat*, 15(3), 579-581, (2022). (公募班の林先生との共同研究)
- *Terao, Y., Honma, M., Asahara, Y., Tokushige, S.I., Furubayashi, T., (他 4 名), Ichikawa, Y., Chiba, A., Ugawa, Y., Suzuki, M. Time distortion in parkinsonism. *Front Neurosci*, 15, 64881. (2021).
- *Masuda, Y., Takemura, H., Terao, M., Miyazaki, A., Ogawa, S., Horiguchi, H., Nakadomari, S., Matsumoto, K., Nakano, T., Wandell, B., Amano, K. V1 projection zone signals in human macular degeneration depend on task despite absence of visual stimulus, *Curr Biol*, 31(2), 406-412, (2021).
- *Shirota, Y., Hanajima, R., Ohminami, S., Tsutsumi, R., Ugawa, Y., Terao, Y. Supplementary motor area plays a causal role in automatic inhibition of motor responses. *Brain Stimul*, 12, 1020-1026, (2019).
- *Kunimatsu, J., Suzuki, T.W., Ohmae, S., *Tanaka, M. Different contributions of preparatory activity in the basal ganglia and cerebellum for self-timing. *eLife*, 7, e35676, (2018).
- Oishi, H., *Takemura, H., Aoki, C, S., Fujita, I., Amano, K. Microstructural properties of the vertical occipital fasciculus explain the variability in human stereoacuity, *Proc Nat Acad Sci USA*, 115, 12289-12294, (2018).
- Kupers, E., Wang, H., Amano, K., Kay, K., Heeger, D. *Winawer, J. A non-invasive, quantitative study of broadband spectral responses in human visual cortex, *PLoS One*, 13, e0193107, (2018).
- 書籍 (6 件中 1 件を掲載)
- Buonomano, D. 著 村上郁也 訳. 脳と時間: 神経科学と物理学で解き明かす〈時間〉の謎. 336p, 東京: 森北出版 (2018)
- 主な学会発表・招待講演 (32 件中 1 件を掲載)
- 田中真樹 “Temporal information processing in the cerebellum and basal ganglia” 2023 Sharif Neuroscience Symposium, 2023 年 3 月 3 日、オンライン
- 主催シンポジウム (3 件) アウトリーチ活動 (6 件中 1 件を掲載)
- 田中真樹、岡田研一リズムに合わせてからだ動くしくみ. JT 生命誌研究館 生命誌, 111 号 2022 年 12 月
- <公募研究> 雑誌論文 (英文 46 報中 16 報を掲載、邦文 2 報)
- Masuda, K., Kon, N., Iizuka, K., Fukada, Y., *Sakurai, T., *Hirano, A. Singularity response reveals entrainment properties in mammalian circadian clock. *Nat Commun*, (in press).
- *Cazettes, F., Mazzucato, L., Murakami, M., Morais, J. P., Augusto, E., *Renart, A., *Mainen, Z. F. A repertoire of foraging decision variables in the mouse brain. *Nat Neurosci*, (accepted) (2023).
- *Ono, D., Wang, H., (3 名), Yamanaka, A., Li, Y., and Sugiyama, T. Network-driven intracellular cAMP coordinates circadian rhythm in the suprachiasmatic nucleus. *Sci Adv*, 9(1), DOI: 10.1126/sciadv.abq7032 (2023).
- Asano F, (12 名), Hirano A, *Funato H, *Yanagisawa M. SIK3-HDAC4 in the suprachiasmatic nucleus regulates the timing of arousal at the dark onset and circadian period in mice. *Proc Natl Acad Sci USA*. 120, e221820912, (2023).
- Chaumon M, Rioux PA, Herbst SK, (25 名), Yotsumoto Y, Vatakis A, Balci F, *van Wassenhove V. The Blursday database as a resource to study subjective temporalities during COVID-19. *Nat Hum Behav*, 6, 1587-1599, (2022).
- Recanatesi, S., Pereira-Obilinovic, U., Murakami, M., *Mainen, Z., *Mazzucato, L. Metastable attractors explain the variable timing of stable behavioral action sequences. *Neuron*, 110(1), 139-153, (2022).
- Li, L., Yotsumoto, Y., *Hayashi, M.J. Temporal perceptual learning distinguishes between empty and filled intervals. *Sci Rep*, 12, 9824, (2022).
- *Takei T, Lomber SG, Cook DJ, Scott SH. Transient deactivation of dorsal premotor cortex or parietal area 5 impairs feedback control of the limb in macaques. *Curr Biol*, 31, 1476-1487, (2021).
- Kolarski, D., Miró-Vinyals, C., Sugiyama, A., Srivastava, A., Ono, D., (4 名), Szymanski, W., Hirota, H., and Feringa, L. B. Reversible modulation of circadian time with chronopharmacology. *Nat Commun* 12, 3164, (2021).
- *Matsuzaki, M., and Ebina, T. Optical deep-cortical exploration in behaving rhesus macaques. *Nat Commun*, 12, 4656, (2021). (invited commentary) (査読あり) .
- Okamoto, K., Ebina, T., Fuji, N., Konishi, K., Sato, Y., Kashima, T., Nakano, R., Hioki, H., Takeuchi, H., Yumoto, J., Matsuzaki, M., and *Ikegaya, Y. TB³⁺-doped fluorescent glass for biology. *Sci Adv*, 7, eabd2529, (2021).
- Yaron A, Kowalski D, Yaguchi H, Takei T, Seki K. Forelimb force direction and magnitude independently controlled by spinal modules in the macaque. *Proc Nat Acad Sci USA*, 117:27655-27666, (2020).
- *Hayashi, M.J., Ivry, R.B. Duration selectivity in right parietal cortex reflects the subjective experience of time. *J Neurosci*, 40(40), 7749-7758, (2020).
- *Matsuzaki, M. and Ebina, T. Common marmoset as a model primate for study of the motor control system. *Curr*

Opin Neurobiol, 64, 103-110, (2020).

Heming EA, Cross KP, Takei T, Cook DJ, Scott SH. Independent representations of ipsilateral and contralateral limbs in primary motor cortex. *eLife*, 1-26, (2019).

Ebina, T., Obara, K., (8名), Yamamori, T., and *Matsuzaki, M. Arm movements induced by non-invasive optogenetic stimulation of the motor cortex in the common marmoset. *Proc Natl Acad Sci USA*, 116, 22844-50, (2019).

主催シンポジウム (3件中1件を掲載)

小野大輔, 平野有紗 第29回日本時間生物学会, (2022年12月3-4日), シンポジウムオーガナイザー
アウトリーチ (27件中1件を掲載)

林正道 「Exhausted neurons help make time seem ... to ... drag」2020年9月14日 nature

[D01] 「獲得する」班

<計画研究>雑誌論文 (英文36報中13報、邦文8報中4報掲載)

* Sato, Y., Sakai, Y., Hirata, S. State-transition-free reinforcement learning in chimpanzees (*Pan troglodytes*). *Learn Behav* (2023).

* 上原泉. 幼児期から思春期の自伝的語りの変遷過程と経験の捉え方. *Clin Neurosci*, 41(8), 3p. (印刷中).

* 浅原正幸・川崎采香・上原泉・酒井裕・須藤百香・谷口巴・小林一郎・越智綾子・鈴木彩香. 「過去」「未来」を主題とする作文の分析. *計量国語学*, 34, (印刷中)

Mitani, K., Kawabata, M., Isomura, Y., & *Sakai, Y. Automated and parallelized spike collision tests to identify spike signal projections. *iScience* 25(10) 105071 (2022).

Sakai, Y., Sakai, Y., (2名), & *Tanaka, S.C. Memory trace imbalance in reinforcement and punishment systems can reinforce implicit choices leading to obsessive-compulsive behavior. *Cell reports* 40(9) 111275 (2022).

*Uehara, I. Changes in children's episodic narratives through long-term repeated recall: Longitudinal case studies. *Jap. Psychol. Res.*, 63, 250-264, (2021).

*Cheong, Y., Uehara, I. Segmentation of rhythmic units in word speech by Japanese infants and toddlers. *Front. Psychol.*, 12, 626662, (2021).

*Sato, Y., Kano, F., Morimura, N., Tomonaga, M., Hirata, S. Chimpanzees (*Pan troglodytes*) exhibit gaze bias for snakes upon hearing alarm calls. *J. Comp. Psychol.*, 136, 44-53, (2021).

*Hanazuka, Y., Futamura, A., Hirata, S., Midorikawa, A., Ono, K., Kawamura, M. The eyes are more eloquent than words: anticipatory looking as an index of event memory in Alzheimer's disease. *Front. Neurol.*, 12, 642464, (2021).

*Sato, Y., Kitazaki, M., Itakura, S., (2名), Tomonaga, M., Hirata, S. Great apes' understanding of biomechanics: eye-tracking experiments using three-dimensional computer-generated animations. *Primates*, 62, 735-747, (2021).

*Sato, Y., Sakai, Y., Hirata, S. Computerized intertemporal choice task in chimpanzees (*Pan troglodytes*) with/without postreward delay. *J. Com. Psychol.*, 135, 185-195, (2021).

*Hirata, S., Betsuyaku, T., Fujita, K., Nakano, T., Ikegaya, Y. Phylogeny and ontogeny of mental time. *Neurosci. Res.*, 170: 13-17, (2021). (B01, D01, E01 班の共同研究)

*Ishibashi, M., Uehara, I. The relationship between children's scale error production and play patterns including pretend play. *Front. Psychol.*, 11, 1176, (2020).

*川崎・上原. 日本人中高生の男女が想起する重要な自伝的記憶の特徴. *認知心理学研究*, 18, 25-40, (2020).

*上原泉. 幼児期のエピソード記憶調査内の発話における過去形や時に関する言葉の使用. *お茶の水女子大学人文科学研究*, 16, 251-263, (2020).

*Kawasaki, A., Uehara, I. Cultural life scripts of Japanese adolescents. *Appl. Cogn. Psychol.*, 34, 357-371, (2020).

*Kano, F., Krupenye, C., Hirata, S., Tomonaga, M., Call, J. Great apes use self-experience to anticipate an agent's action in a false belief test. *Proc Natl Acad Sci USA*, 116, 20904-20909, (2019).

書籍 (5件中1件掲載)

平田聡, 嶋田珠巳, 『時間はなぜあるのか? チンパンジー学者と言語学者の探険』, ミネルヴァ書房, (2022)

招待講演等 (15件中1件を掲載)

Hirata, S. Understanding chimpanzees and bonobos. The 7th International Workshop on Tropical Biodiversity Conservation: Focusing on Large Animal Studies, Kota Kinabalu, Malaysia, (2018).

アウトリーチ (10件中1件を掲載)

平田聡. NHK 番組 「ヒューマニエンス (神経)」 出演 2023/4/25 放映

<公募研究> 雑誌論文 (英文14報中4報掲載、邦文1報)

*Hashimoto T., Yokota S., Umeda S., Kawashima R. Dynamic functional connectivity associated with prospective memory success in children. *Neuroimage Rep* 2, 144, (2022).

*Itoh, K., Konoike, N., Nejime, M., Iwaoki, H., Igarashi, H., Hirata, S., Nakamura, K. Cerebral cortical processing time is elongated in human brain evolution. *Sci. Rep.*, 12, 1103, (2022).

*Doi, H., Iijima, N., (6名), Tsuji, T. Prediction of autistic tendencies at 18 months of age via markerless video analysis of spontaneous body movements in 4-month-old infants *Sci. Rep.*, 12, 18045, (2022).

*Doi, H., (4名), Nagasawa, T. Automatic classification of adult males with and without autism spectrum disorder by non-contact measurement of autonomic nervous system activation. *Front. Psychiatry*, 12, 625978, (2021).

招待講演等 (2件) 学会発表 (2件) 書籍 (6件中1件を掲載)

伊藤浩介. 聴覚による知覚. 「霊長類学の百科事典」 (中川尚史編), 丸善出版, (2023年刊行予定).

アウトリーチ活動 (2件中1件を掲載)

伊藤浩介. NHK 番組 「ヒューマニエンス (神経)」 出演 2023/4/25 放映

[E01] 「失う」班

<計画研究>雑誌論文 (英文 97 報中 26 報掲載)

- Yawata, Y., Shikano, Y., Ogasawara, J., Makino, K., Kashima, T., Ihara, K., (3 名), S., Tanaka, K.F., *Ikegaya, Y. Mesolimbic dopamine release precedes actively sought aversive stimuli. *Nat. Commun.*, 14:2433, 2023.
- Kuga, N., Nakayama, R., Morikawa, S., Yagishita, H., Konno, D., Shiozaki, H., Honjo, N., Ikegaya, Y., *Sasaki, T., Hippocampal sharp wave ripples underlie stress susceptibility in male mice. *Nat. Commun.*, in press.
- Kuga, N., Abe, R., Takano, K., Ikegaya, Y., *Sasaki, T. Prefrontal-amygdalar oscillations related to social behavior in mice. *eLife*, 11:e78428, 2022.
- Noguchi, A., Huszár, R., Morikawa, S., Buzsáki, G., *Ikegaya, Y. Inhibition allocates spikes during hippocampal ripples. *Nat. Commun.*, 13:1280, 2022.
- Hoshi, Y., Shibasaki, K., Gailly, P., Ikegaya, Y., *Koyama, R. Thermosensitive receptors in neural stem cells link stress-induced hyperthermia to impaired neurogenesis via microglial engulfment. *Sci. Adv.*, 7:eabj8080, 2021.
- Nishimura, Y., Ikegaya, Y., *Sasaki, T. Prefrontal synaptic activation during hippocampal memory reactivation. *Cell Rep.*, 34:108885, 2021.
- Shikano, Y., Ikegaya, Y., *Sasaki, T. Minute-encoding neurons in hippocampal-striatal circuits. *Curr. Biol.*, 31:1–12, 2021.
- Okamoto, K., Ebina, T., Fujii, N., Konishi, K., Sato, Y., Kashima, T., Nakano, R., Hioki, H., Takeuchi, H., Yumoto, J., Matsuzaki, M., *Ikegaya, Y. Tb³⁺-doped fluorescent glass for biology. *Sci. Adv.*, 7:eabd2529, 2021.
- Igata, H., Ikegaya, Y., *Sasaki, T. Prioritized experience replays on a hippocampal predictive map for learning. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 118:e2011266118, 2021.
- Miyawaki, T., Morikawa, S., Susaki, E. A., (3 名), Ueda, H. R., *Ikegaya, Y. Visualization and molecular characterization of whole-brain vascular networks with capillary resolution. *Nat. Commun.*, 11:1104, 2020.
- Ishikawa, T., *Ikegaya, Y. Locally sequential synaptic reactivation during hippocampal ripples. *Sci. Adv.*, 6:eay1492, 2020.
- *Ikegaya, Y., Matsumoto, N. Spikes in the sleeping brain. *Science*, 366:306-307, 2019.
- Nakashima, A., Ihara, N., Shigeta, M., Kiyonari, H., Ikegaya, Y., *Takeuchi, H. Structured spike series specify gene expression patterns for olfactory circuit formation. *Science*, 365:eaaw5030, 2019. recommended in F1000 prime.
- *Nomura, H., Mizuta, H., Norimoto, H., (15 名), Minami, M., Takahashi, H., Ikegaya, Y. Central histamine boosts perirhinal cortex activity and restores forgotten object memories. *Biol. Psychiat.*, 86: 230-239, 2019.
- Abe, R., Okada, S., Nakayama, R., Ikegaya, Y., *Sasaki, T. Social defeat stress causes selective attenuation of neuronal activity in the ventromedial prefrontal cortex. *Sci. Rep.*, 9:9447, 2019. recommended in F1000 prime.
- Aoki, Y., Igata, H., Ikegaya, Y., *Sasaki, T. Integration of goal-directed signals onto spatial maps of hippocampal place cells. *Cell Rep.*, 27:1516-1527, 2019.
- Sakaguchi, T., Iwasaki, S., Okada, M., Okamoto, K., *Ikegaya, Y. Ethanol facilitates socially-evoked memory recall in mice by recruiting pain-sensitive anterior cingulate cortical neurons. *Nat. Commun.*, 9:3526, 2018.
- Shimbo, A., Izawa, E.I., & *Fujisawa, S. Scalable representation of time in the hippocampus. *Sci. Adv.* 7:eabd7013, 2021.
- Masuda, A.*, Sano, C., Zhang, Q., Goto, H., McHugh, T.J., Fujisawa, S., *Ito, S. The hippocampus encodes delay and value information during delay-discounting decision making. *eLife*, 9:e52466, 2020.
- *Shinagawa, K., Itagaki, Y., Umeda, S. Coexistence of thought types as an attentional state during a sustained attention task. *Sci Rep*, 13:1581, 2023.
- Katayama, N., *Nakagawa, A., Umeda, S., Terasawa, Y., Abe, T., Kurata, C., Sasaki, Y., Mitsuda, D., Kikuchi, T., Tabuchi, H., Mimura, M. Cognitive behavioral therapy effects on frontopolar cortex function during future thinking task in major depressive disorder: A randomized clinical trial. *J Affect Disord*, 298:644-655, 2022.
- Katayama, N., *Nakagawa, A., Umeda, S., Terasawa, Y., Kurata, C., Tabuchi, H., Kikuchi, T., Mimura, M. Frontopolar cortex activation associated with pessimistic future-thinking in adults with major depressive disorder. *Neuroimage Clin*, 23:101877, 2019.
- Hanazuka, Y., Futamura, A., Hirata, S., Midorikawa, A., Ono, K., *Kawamura, M. The eyes are more eloquent than words: anticipatory looking as an index of event memory in Alzheimer's disease. *Frontiers in Neurology*, 1830, 2021.
- Honma, M., Murakami, H., Yabe, Y., Kuroda, T., Futamura, A., Sugimoto, A., Terao, Y., Masaoka, Y., Izumizaki, M., Kawamura, M., Ono, K. Stopwatch training improves cognitive functions in patients with Parkinson's disease. *Journal of Neuroscience Research*, 99, 1325-36, 2021.
- Honma, M., Itoi, C., Midorikawa, M., Terao, Y., Masaoka, Y., Kuroda, T., Futamura, A., Shiromaru, A., Ohta, H., Kato, N., Kawamura, M., & Ono, K. Contraction of distance and duration production in autism spectrum disorder. *Scientific Reports*, 9 (1), 8806, 2019.
- Watanabe, K., Masaoka, Y., Kawamura, M., Yoshida, M., Koiwa, N., Yoshikawa, A., Kubota, S., Ida, M., Ono, K., Izumizaki, M. Left posterior orbitofrontal cortex is associated with odor-induced autobiographical memory: an fMRI study. *Frontiers in psychology*, 9, 687, 2018.
- <公募研究>雑誌論文 (英文 26 報中 4 報掲載)
- Takahashi M T, *Hirano A. (6 名), Yanagisawa M, Vogt E K, Tokuda T, *Sakurai T. Optogenetic Induction of Hibernation-like state with modified Human Opsin4 in Mice. *Cell Reports Methods*, 2, 100336, (2022).
- Hirano K, Morishita Y, Minami M, *Nomura H. The impact of pitolisant, an H3 receptor antagonist/inverse agonist, on perirhinal cortex activity in individual neuron and neuronal population levels. *Sci Rep*. 12:70152022

*Yamada, K. & *Toda, K. (2022). Pupillary dynamics of mice performing a Pavlovian delay conditioning task reflect reward predictive signals. *Front Sys Neurosci*, 16:1045764.

Kaneko, S. †, Niki, Y., Yamada, K., Nasukawa, D., Ujihara, Y. & *Toda, K. (2022). Systemic injection of nicotinic acetylcholine receptor antagonist mecamylamine affects licking, eyelid size, locomotor and autonomic activities but not temporal prediction in mice. *Mol Brain*, 15, 77.

書籍 (6件中1件掲載)

河村満, 越智隆太, 花塚優貴, 二村明德, 緑川晶. 第2章時間の流れの科学—患者さんの内観からわかること, 時間と言語, 嶋田珠巳, 鍛冶広真 編, 三省堂, pp.24-39, 2021.

学会発表・招待講演等 (39件中2件掲載)

池谷裕二、自発脳、第39回日本脳神経外科コンgres総会(横浜)、2019年5月18日、特別講演
Fujisawa, S. Neuronal encoding of temporal and spatial information in the hippocampus. The 1st Asia-Pacific Computational and Cognitive Neuroscience Conference (台湾、オンライン)、2020年9月27日、招待講演
主催シンポジウム (3件中1件掲載)

藤澤茂義、水関健司、脳の情報処理研究の最前線: 神経コーディングやオシレーションを中心として、千里ライフサイエンスセミナー(大阪)、2022年11月30日

アウトリーチ(51件中4件掲載)

池谷裕二、「脳について知ろう」、2023年3月17日、有明学園有明高等学校 他全国で38件

池谷裕二、「数分間の時間認知を担う脳の神経活動を発見」、2021年2月5日、プレスリリース

藤澤茂義、「脳はいかにして”時間”を認識するのか?」、2021年4月12日、クロズアップ科学道

藤澤茂義、「海馬による相対的な時間表現」、2021年2月4日、プレスリリース

研究成果

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

【A01】「作る」班

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか。

①事象の時間関係をアノテーションした大規模言語コーパスを入力として、時間関係を出力する人工神経回路を構築することを第一の目標とした。浅原らは Chat-GPT にも用いられている Transformer (コンテキストに応じて語彙のベクトル化を行う人工神経回路) の有効性にいち早く注目して、Transformer の拡張モデルである BERT の日本語モデルを構築して公開した(浅原・加藤 2020、言語処理学会賞)。浅原、小林、公募班の Cheng らは、BERT を用いて、自然言語文書中の時間情報を識別する人工神経回路を構築し、世界トップ水準の性能を達成した(Cheng ら 2020)。②人工神経回路を他班に提供して、中間層の表現を脳活動データと対照して対応関係を明らかにすることが次の目標である。この点については、浅原と小林らは開発した人工神経回路を B01 班の西本や貴島らが取得した脳活動データの解析に適用して「時間地図」の描出と成因の解明に活用した。③さらに言語学、哲学の基礎的考察に基づいて、ヒトが脳内に抱く時間意識の実体解明を大きく進展させるとともに、哲学・言語学の分野にも新たな展開をもたらすことを最終的な目標とした。この目標については嶋田が中心となって「時間言語フォーラム」を開催して、言語学、自然言語処理、神経科学、神経学分野の専門家の交流を15回にわたり重ねてきた。フォーラムは異分野の時間に対する考え方の相互理解と共有・修正の機会として実に見事に機能した。以上の通り、領域の中核として、所期の3目標を十分に達成した。

(2) 本研究領域により得られた成果

<計画研究> ①人工神経回路の構築: 国語研日本語ウェブコーパスを使って BERT を日本語化した(浅原・加藤 2020、NLP2020 言語資源賞)。さらに BERT を用いて自然言語文書中の時間情報を識別する人工神経回路を構築し、世界トップ水準の性能を達成した(Cheng ら 2020)。時間関係に関する常識を質問応答する英語の課題 (MC-TACO) を対象に、時間識別を行う深層学習モデルを構築し(Kanashiro et al., 2020) Allen Institute for AI が主催するコンペティションで世界1位を獲得した。②時間生成における言語の役割: 人間の言語における「基本的な」時間語彙があるかどうかを明らかにすることは研究の目標の一つである。Kaji, Sasaki, & Shimada (2019)では時間語彙を対照するための枠組みを作り、周期的な時間に関する時間表現について日本語、英語、ロシア語、ツングース語に共通する特徴を明らかにした。嶋田・鍛冶編著 (2021)では時間表現の「基本的な」文法機構を検討する(嶋田章)とともに、「時間と言語」をテーマとした言語学、哲学、神経科学研究を全14章に纏めている。青山(2021)はエピソード記憶の成立におい

て言語の果たす役割を検討した。③日常の内観の解明：「時間の流れ」の内観は日常的なものであり、かつ、地域や時代に縛られない一般性をもっている。しかし、この内観と、心理学・神経科学・物理学における重要なパラメータとしての時間とのあいだには齟齬がある。青山 (2019)は、ポストディクションと呼ばれる心理学・神経科学的現象や、物理法則の非A系列的性格等を多角的に論じることで齟齬の理由を明示した。また、嶋田らは事象順序の把握における時間副詞、時制辞、推論、アスペクトの機能の解明を進めた (嶋田・鍛冶 編著 2021, Yoshimoto et al. 2021)。④時間の発生機構の解明：D01 班と協力し、ヒトの成長および進化史の観点から時間概念の形成に関して考察した (平田・嶋田 2022)。

<公募研究> ①人工神経回路の構築：Cheng が開発した英語用時間識別モデルを小林、浅原らと共同で日本語化するとともに、入力層には浅原らが新たに開発した BERT モデルを用いた。その結果時間識別の対象全てで既存モデルを上回ることに成功した(Geng ら, 2020, 2021)。②時間表現の言語学的分析：日本語従属節の時制形式と時間解釈において、論理関係を表す副詞節と時間関係を表す副詞節の解釈の基準に差異があることから、統語構造のみならず副詞節の意味も時間解釈に影響を与えることを示した(有田 2021)。

【B01】「流れる」班

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか。

「過去-現在-未来」の時間の流れの意識の神経基盤を探求した。①北澤と A01 班の嶋田は日本語、中国語、英語を母語とする被験者群に対して言語刺激を用いた脳活動計測を行い、どの母語群でも大脳皮質内側面の楔前部が「現在感」を喚起する刺激に強く反応することを示した。②公募班の山口は、楔前部が「過去」の記憶生成に重要な海馬傍回-海馬領域と強く結合していることを示した。③北澤は、楔前部を抑制すると、過去の記憶が障害されることを示した。これらの知見から、楔前部の現在の情報が海馬に送られて記憶の中に過去の事象が順序良く保存されていく、という現在から過去へ流れる時間生成モデルを提案した。④北澤と西本らは A01 班の浅原と小林らと共同して、自然言語刺激に対する人工神経回路と脳の応答を比較した。時間の順序構造に関する脳活動を網羅的に探索し、活動領域を特定した(A01 班、小林 2023)。⑤貴島と柳澤らは、動画視聴中の皮質脳波を計測し、時間情報に応じて楔前部や側頭葉の γ 帯域の脳活動が変化することを示した。最後に、北澤らは時間の流れの方向(時間の矢)の神経基盤を調査し、右大脳皮質-左小脳ループが関与することを示唆した。これらの研究から、楔前部と海馬のネットワークと右大脳と左小脳のループが時間の流れの神経基盤となることを示した。以上の通り、時間の流れの神経基盤を明らかにするという所期の目標は達成された。

(2) 本研究領域により得られた成果

<計画研究>①人工神経回路の構築：西本らは最新の画像生成 AI である Stable Diffusion の内部表現を介してヒト脳活動を解読して知覚内容を映像化した (Takagi & Nishimoto, 2023)。Science 誌を始めとする国内外の 60 を超える媒体で報道された。北澤は人工神経回路の基礎と神経科学への応用に関する解説書を著した(北澤 2020)。中野は人工神経回路を顔画像の認知科学研究や瞬目の確率推定に応用した(中野ら 2020, Nakano & Yamamoto, 2022)。貴島と柳澤らは人工神経回路を使って頭蓋内脳波波形からてんかん発作を同定することに成功した(Yamamoto et al., 2021)。本研究はてんかん財団研究褒賞等を受賞した。また機械学習の手法を改良して頭蓋内脳波や脳磁図信号を用いた疼痛制御や機器制御に応用した(Shiraishi et al., 2020, Yanagisawa et al. Neurology, 2020)。②時間地図の機能解明：北澤・嶋田(A01 班)らは言語刺激で喚起される「現在感」が日本語・中国語・英語を母語とする 3 群に共通して楔前部を強く活動させることを明らかにした(Tang et al. 2021)。北澤は静磁場を用いて楔前部を抑制すると、数秒前に見た風景の記憶が著しく障害されることを見出した(Yamazaki & Kitazawa, 2020)。西本らは 103 個の認知課題に対する脳の活動を計測・解析して、脳の認知機能マップと課題間の類似性を反映する課題機能マップを描き出した。時間認知機能は脳の様々な領域に様々な組み合わせで分布していることが明らかとなった(Nakai & Nishimoto Nat Commun, 2020)。③日常の内観の解明:北澤らは「時間が一方向に流れる」ように感じられる理由を探る実験系を開発して、脳の予測にかかわる左小脳の内部モデルと右外側大脳皮質が作る回路が重要な役割を果たすことを示唆する成果を得た (Hanyu et al., 2022, 2023)。

<公募研究> ①人工神経回路の構築：池上らは、視覚的な入力時系列の情報を圧縮したうえで新たな出力時系列を生成する人工神経回路を構築して、海馬が記憶した事象を replay する機能を模倣した(Kojima & Ikegami 2022)。さらに VR 技術を使って実装し Mind Time Machine II として公開した。②時間地図の機能解明：山口らは楔前部が「過去」の記憶生成に重要な海馬傍回-海馬領域と解剖学的にも機能的にも強く結合していることをヒトで示した (Jitsuishi & Yamaguchi, 2021, 2023)。羽倉は未来に行う運動を脳がどのように準備しているかを調べ、準備する運動候補の数が異なると、運動出力が同じでも違う運動として

実行されていることを明らかにした(Hagura et al., 2020)。

【C01】「刻む」班

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか。

C01 班では、知覚と行動の制御に関わる時間情報の脳内処理のメカニズムの解明とその操作法の開発、さらには神経疾患における病態生理の理解を目指して研究した。計画班での 11 回に及ぶオンライン会議を通じて、多くの新しい知見が得られ、関連する学術分野に大きく貢献することができた。また、本領域の目標である③「日常の内観と神経活動の関係」の一部を明らかにし、④「新たな時間の操作法」を開発することができた。田中(神経生理学)らは、計時やリズム知覚を必要とする行動課題を行っているサルの小脳と線条体の神経活動を詳しく調べ、これらの皮質下部位の機能の違いを明らかにした。村上(実験心理学)らは、時間長や追従性などの心的時間軸上の知覚特性を心理物理学的手法および脳波計測を用いて調べ、運動対象の時間過大視や、復帰抑制の事態で生じる時間過小視が生じるメカニズムを解明するとともに、視覚運動・位置処理の律動性を明らかにした。寺尾(病態生理学)らは、ヒトで時間幅の認知や学習に関わる機構を詳しく調べ、とくにパーキンソン病での時間情報処理課題の成績とドパミン欠乏の程度や年齢との関係を明らかにし、さらに磁気刺激や脳深部刺激などによる介入研究を行った。天野(先端計測)らは、異なる周波数の神経律動が果たす機能の違いを心理実験、脳磁図計測の両面から検討し、注意の瞬きにシータ波とアルファ波が関与することを見出すとともに、音刺激を用いた介入によってその大きさを変化させることに成功した。また、本研究項目には多くの公募研究班が参加し、げっ歯類や鳥類、サルなどを用いた動物実験やヒトを対象にした心理実験、介入実験が多数行われた。これらにより、時間知覚・生成に関わる神経機構と疾病時の病態を明らかにし、新たな機能介入法を開発するという本研究項目の目的は十分に達成された。

(2) 本研究領域により得られた成果

<計画研究> 期間中に 56 報の英文論文を発表した。代表的なものとして、同期運動やリズム知覚の際の神経活動をサルで調べた田中らの論文(Kameda et al., *PNAS*, 2023; Okada et al., *Nat Commun*, 2022) や、脳情報の時間発展を視覚心理学実験で示した村上らの一連の *Vision Res* 論文、頭蓋磁気刺激の新しい手法や行動課題への影響を検討した天野らの論文(Kimura et al., *Brain Stimul*, 2022) や寺尾らの論文(Shirota et al., *Brain Stimul*, 2019)、パーキンソン病や脊髄小脳変性症での時間知覚を詳しく調べた寺尾らの複数の論文などを挙げるができる。また、村上は、世界的な時間研究者である Buonomano 博士(UCLA)の書籍を邦訳し、時間研究の啓蒙を行った(村上, 2018)。

<公募研究> 前期 7 課題、後期 6 課題(うち 1 課題は重複制限のため廃止)の公募研究が参加した。時間情報処理の神経機構について多面的な解析が行われ、領域期間中に 46 報の英文論文が発表された。代表的なものを挙げると、①四本らは、コロナ禍による生活の変化が時間知覚に及ぼす影響を大規模な国際共同研究で調べ、その成果を公募期間終了後に論文発表した(Chaumon et al., *Nat Hum Behav*, 2022)。②林らは、時間知覚の神経基盤が時間長ごとに異なるチャンネルをもつことを示すと同時に(Hayashi & Ivry, *J Neurosci*, 2020)、時間長の情報が持続時間(単一の刺激の持続時間)として与えられる場合と間隔時間(複数の短い刺激の時間間隔)として与えられる場合で異なることを明らかにした(Li et al., 2022)。また、③蝦名らは、マーモセットの脳皮質を対象としたカルシウムイメージング技術を開発し(Ebina et al., *PNAS*, 2019)、過去、現在、未来の行動指標(前肢運動や視覚刺激等の情報)がどの領野で表現されているかを解析するための方法論を確立した(Matsuzaki & Ebina, *Nat Commun*, 2021)。④武井らは、時間遅れを伴う感覚情報を運動制御に活かすための予測神経メカニズムをサルで調べ、後頭頂葉において「過去」の感覚情報と予測的な情報を統合して、「現在」の状態を推定することを示唆する知見を得た(Takei et al., *Curr Biol*, 2021)。また、⑤小野らは、睡眠覚醒のタイミングを調節する哺乳類の概日時計中枢である視交叉上核における cAMP の機能を明らかにした(Ono et al., *Sci Adv*, 2023)。さらに、⑥村上(誠)らは、遅延報酬をどれくらい待って、いつ待つのを諦めるかを決定するための神経メカニズムを明らかにするために、頭部固定マウスにおける遅延報酬課題を確立するとともに、関連した研究成果を公募期間後に発表した(Cazettes et al., *Nat Neurosci*, 2023; Recanatesi et al., *Neuron*, 2022)。これ以外にも、概日時計から睡眠覚醒リズムを生み出す分子・神経機構を調べた研究(平野)、鳴禽類およびヒトの発話リズムの研究(田中(雅))、事象の終了後に時間特異的に活動する海馬の細胞群の活動を詳細に調べた研究(水田)などによって、多くの研究成果が生み出された。

このように、C01 班からは期間中に多数の英文論文が発表され、当該分野に大きく貢献した。

【D01】「獲得する」班

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか。

ところが時間を生み出すのはなぜ、どのような仕組みによるのか、その個体発生（ヒトの生後の発達）と系統発生（生物進化）を明らかにし、究極要因（進化的適応と機能）について検討することを目的とした。具体的には、第一に、個体発生を探る目的として、時間に関係したヒトの言語表現に関する発達加齢研究をおこない、ヒトがいつからどのように時間を認識するのかを明らかにすることを目指した。第二に、系統発生を探る目的として、ヒトとヒト以外の動物における時間認識及び認知における時間の影響の比較研究をおこない、時間が認知処理に及ぼす影響が生物進化においてどのように形成されてきたのかを明らかにすることを目指した。また、数理モデルを用いて時間に関係した心理・認知に迫り、脳内処理機構をモデル化すると同時に、進化的適応や機能について考察することを試みた。その結果、本領域設定期間において、A01 班が作成した数理モデルに、D01 班が収集した様々な年代の人（幼児～大人）が作文した文章データを入力することにより、年代の違いを可視化することに成功した。また、ヒトを対象に設計された時間的特徴を組み込んだ強化学習モデルを用いてチンパンジーの認知課題の振る舞いを説明できる一方で、ヒト、チンパンジー、各種サル類、ウマにおいて聴覚誘発電位の潜時に顕著な違いが見られることも明らかとなった。究極要因としては、時間は変化をとらえて将来を予測するための媒体であるという適応的意義があり、ヒトはその時間窓を伸長させることで環境をより深く捉えることができるようになったと考えられる。ヒトを対象にした発達研究においても、ヒト以外の動物との比較研究においても、当初の目的に沿った研究成果をあげることができ、さらに研究成果の一般還元も兼ねて一般向け書籍「時間はなぜあるのか」を刊行し、時間の適応的意義も含めた議論を展開できたことから、期待通りの達成度と言える。

(2) 本研究領域により得られた成果

<計画研究>ヒトを対象とした発達研究により、生後半年過ぎから言語音リズムを体得すること (Cheong & Uehara, 2021)、4 歳頃の記憶に関する言葉を獲得し過去形の使用が格段と増える一方で 4 歳ではまだ未来に関する時の言葉を自発的には発しないこと (上原, 2020)、中高生は児童より未来イメージが具体的だが成人よりは未来展望が希薄であること (Kawasaki & Uehara, 2020; 川崎・上原, 2020) などが明らかとなった。また、A01 班作成の数理モデルに D01 班収集の作文データを入力することで、児童と成人（若年、中年、高齢者）の時間表現の違いが明らかになった (浅原・川崎・上原ほか、印刷中)。ヒト以外の動物の比較研究により、類人猿が自己経験を用いて他者の行動を予測することを視線計測の研究によって明らかにした (Kano et al. PNAS 2019)。また、これと同じ視線計測を用いて、ヒトの健忘症における記憶の再生において非顕在的な過程が含まれることが明らかになった (Hanazuka et al., 2021, E01 班との共同研究)。コンピュータを用いたタッチパネル課題において、時間割引課題や非マルコフ連鎖課題をおこない、時間と関連した認知機構を明らかにするとともに、強化学習モデルによるフィッティングが可能であることを示した (Sato et al., 2021; 2023)。また、同様の強化学習モデルによって、ヒトの強迫性障害における行動パターンを説明可能であることも示した (Sakai et al., 2022)。D01 班の平田と A01 班の嶋田の共著により『時間はなぜあるのか』(ミネルヴァ書房、2022) を著し、言語学と動物心理学の学際融合的議論をもとにして、時間の発生と進化について迫るとともに、進化的適応と機能についてまとめた。

<公募研究>伊藤はヒト脳の進化における「脳サイズの増大」と「神経細胞数の増大」がヒト大脳の時間処理に与えた影響を明らかにするため、霊長類 4 種と非霊長類哺乳類 2 種（ウマ・マウス）で聴覚誘発電位の潜時比較に成功し、「脳サイズの増大」ではなく「神経細胞数の増大」によってヒト脳処理が遅くなったことを示す結果を得た (e.g., Itoh et al., 2022:公募班・伊藤と D01 計画班との共同研究)。橋本は日常場面に近い展望記憶課題を、7～15 歳の子ども 108 名に実施して、背景課題と未来に実行すべき意図とを行き来するダイナミクスに対応する動的脳内ネットワークを明らかにするとともに

(Hashimoto et al., 2022)、発達に伴いより動的、短時間での変動が高まるネットワークも発見した。土居は非接触型計測による情報反応評価系を確立し (Doi et al, 2021; 2022)、乳幼児の情動反応が時間知覚に与える影響を検証するための研究基盤を構築するとともに、時間知覚と関係する音楽・言語認知の進化的基盤に関して考察した(Doi & Masataka, 2021; Doi, 2020; 土居, 2021)。

【E01】「失う」班

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか。

適切な時間経験の感覚を持ち、時間に対して臨機応変に対処する能力は、生命の生存に必須であり、ヒトにおいては高度な社会を築くための心理基盤になっている。しかし、時間処理の能力がどのようにして脳の中で生まれ、またそれがどのように崩壊し、しばしば疾患となるのかは未解明である。E01 班では、

どのように秒、分、時間、日、年といった階層的時間を経験し、どのように過去と未来とブリッジすることで現在の自己に連続性を生じさせるか、また、こうした時間処理機能がどのように情動や意思決定に影響を及ぼすかを探究することを目標として研究を進め、当初の想定を超える優れた成果が得られた。分単位の長い時間の時間表象や、他者の時間経験の脳内表象などは、同分野でも特筆すべき知見をもたらし、さらに退屈な状態や低体温状態、不快な心理状態における時間知覚の変化、パーキンソン病や自閉スペクトラム症などの疾患や障害における時間変容を測定することにも成功し、心理的時間がどのように生成し、変動するののかの実体とメカニズムに迫ることができた。これらの実績は世界的に注目すべきものであり、本領域メンバーによる協働の賜である。

(2) 本研究領域により得られた成果

<計画研究> ①池谷：動物は、将来起こる出来事を予測し、時間経過に応じて適切な行動を選択していく必要がある。このような時間の情報処理の脳内メカニズムに関する研究は、従来から行われてきたが、その多くは数秒単位（5秒から20秒程度）の短い時間を対象としたものであり、生存により重要な数分間におよぶ時間経過の認知に、脳のどのような神経活動が重要であるかという点はほとんど知られていない。そこで、5分おきにエサの報酬を獲得するようにラットを訓練させたところ、神経細胞は、分単位の時間経過と関連して活動を変化させることがわかった。本研究により新たに解明された数分間に及ぶ脳活動は、動物が時間経過を生体内に刻むための普遍的な機構と考えられる (Shikano, *Curr Biol* 2021)。

②池谷：マウスを遊具のない部屋に入れることで、遊具のある部屋では避けてしまうような嫌悪的な空気刺激を自ら受けに行くようになることを発見した。同様な行動は、退屈を感じているヒトを対象とした心理学実験で報告があり、マウスの退屈を反映した行動であると考えらる。マウスが受動的にエアパフを受けた直後は、腹側線条体のドーパミン濃度が減少したのに対し、自ら空気刺激を受けに行く直前には、エサを食べる時と同じようなドーパミン濃度の増加が観察された。こうしたマウスの中には頻繁に空気刺激を受けに行く中毒状態になる個体が20%程度存在し、一度中毒状態になると、遊具のある部屋に戻しても、頻繁に空気刺激を受けに行くことがわかった。本発見は、退屈の脳内メカニズムを解明する第一歩となるだけでなく、中毒や自傷行為など退屈感が関与するとされる精神障害の治療法の開発への貢献が期待される (Yawata et al., *Nat Commun* 2023)。

③藤澤：脳で認識される時間情報がどのように神経細胞で表現され、またそれが環境や状況に応じてどのように変化したり崩壊したりするのかを解明するため、げっ歯類動物での行動神経生理学的アプローチにより研究を進めた。その結果、海馬の時間を表現する細胞は必要に応じてその時間表象をフレキシブルに変えられるということも明らかになった。本研究の結果は、海馬の細胞群の時間情報の表現とその変容の神経メカニズムを理解する上で重要な知見であると考えられる (Shimbo et al., *Sci Adv* 2021)。

④梅田：ヒトを対象とした時間的方向性に基づく思考の行動的特性とその神経メカニズムに関する実験を実施した。中心的に取り上げた認知機能は、未来思考性であり、脳機能画像研究の成果から、前頭前野の先端部に当たる前頭極（ブロードマン10野）が共通して深く関与することが明らかになった (Katayama et al, 2019)。うつ病を対象とした研究の成果からは、うつ症状の緩和に伴い、症状が回復することと前頭極の課題遂行中の活動との間に密接な関係があり、未来思考性の変化がうつ症状の改善と深く関連することが解明された (Katayama et al., 2022)。また、未来思考性の背景にあるマインドワンダリングについても脳波を用いた検討を行い、注意制御が変化することが気づきの背景として作用し、思考の時間的方向性を導く可能性が示唆された (Shinagawa et al., 2021)。

⑤河村：脳内における時間認知の神経基盤の解明を目的に、脳損傷や認知症・パーキンソン病をはじめとする神経変性疾患罹患者、自閉症スペクトラム等の発達障害を対象に神経心理学的手法を用いた検討を行った。その結果、脳機能の変化によって生じる時間認知障害は異なる疾患の間で共通した特徴があることが示唆された (Honma et al. 2019 ; Honma et al. 2021 ; 河村ら 2021)。特にパーキンソン病患者では時間計測のトレーニングが時間認知障害の改善につながる可能性が示された (Honma et al. 2021)。また、平田ら (D01班) との共同研究で、動物行動学研究で用いられていたアイトラッキング法を用いたアルツハイマー型認知症患者の記憶時間評価の開発も行うことができた。これらの成果から、従来あまり注目されてこなかった高次脳機能としての時間認知に関する知見を積み上げるとともに、評価法および治療法という臨床応用への展望が生まれた。

<公募研究>

①兎田：私たちは日常生活において「楽しい時間が早く過ぎ去る」ことを体験しているが、その具体的な神経基盤の大部分は明らかになっていない。時間の予測をしている最中の瞳孔の大きさを計測すること

によって、予測と生理指標の関係について明らかにし (Yamada & Toda, 2022)、薬理的な阻害によって時間の知覚を生み出している生物学的なメカニズムについても明らかにした (Kaneko et al., 2022)。

②平野：冬眠のような低代謝・低体温状態においてどのように時の流れが認知されているのかを明らかにすることを目的に、冬眠様状態のマウスにおける概日時計の機能を調べた。その結果、冬眠中は神経活動が大きく抑制されているにもかかわらず概日時計は変わらぬ速さで時を刻んでいることが明らかとなった。さらに詳細な時間認知を明らかにするため、高い時間分解能で低体温誘導する実験系を確立した (Takahashi et al., 2022)。

③野村：これまでに脳内のヒスタミンを増加させる薬物 (H3 受容体拮抗薬・逆作動薬) によって失われた記憶想起が回復することを明らかにしてきたが、この種の薬物によって生体でどのように神経活動が調節されるかは不明だった。そこで嗅周皮質の多数の神経細胞の活動を同時にイメージングした結果、ヒスタミン H3 受容体拮抗薬ピトリサントが、嗅周皮質の一部の神経細胞の活動、特に同期活動を上昇させることがわかった。こうした同期活動の上昇が想起回復に関与する可能性が考えられる (Hirano et al., 2022)。